Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
Кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств

Паспорт
расчетно-графического задания (работы)

по дисциплине «Электродинамика и распространение радиоволн», 5 семестр

1. Методика оценки

Выполнение расчетно-графического задания (работы) (далее - РГЗ(Р)) является формой текущей аттестации (контроля) по дисциплине, предусмотренной учебным планом. Цель РГЗ(Р): студенты должны освоить методику расчета электромагнитного поля.

Обязательным элементами РГЗ(Р) являются анализ заданного типа волны, выбор и обоснование временные функции, а также изображение структуры силовых линий поля в трех проекциях или средствами компьютерной графики. При этом красными линиями изображаются силовые линии электрического поля, зелеными – магнитного поля, а синими – плотность тока смещения в волноводе.

Вариант задания определяется преподавателем. РГЗ(Р) выполняется индивидуально.

Количество заданий достаточно для обеспечения, каждого обучающегося индивидуальным заданием РГЗ(Р).

Замена задания РГЗ(Р) осуществляется по согласованию с преподавателем из числа резервных (не занятых) заданий.

Перед выполнением задания студент должен ознакомиться теоретическим материалом в соответствии с заданием на РГЗ(Р).

Преподаватель осуществляет руководство по выполнению задания, оказывает консультационную помощь и принимает отчет по РГЗ(Р).

По результатам выполнения РГЗ(Р) выполняется отчет, который состоит из следующих частей:

1. Титульный лист
2. анализ заданного типа волны
3. выбор и обоснование временных функций
4. уравнения силовых линий поля заданной волны

При выполнении РГЗ(Р) оцениваются: тщательность анализа заданного типа волны; обоснованность выбора временных функций; правильность уравнений силовых линий поля.

Требования к оформлению:

Объем РГЗ(Р) до 15 страниц машинописного текста формата А4. Шрифт Times New Roman, 14. Формулы набираются в редакторе Math Type. Размещение сканированных формул не допускается. Нумерация страниц сквозная, в нижней части листа по центру арабскими цифрами. Работа должна быть отредактирована, не содержать орфографических, синтаксических и стилевых ошибок.

РГЗ(Р) в установленные сроки сдается в электронном виде на кафедру для проверки. Преподаватель оценивает качество работы, отмечает положительные стороны и недостатки работы и определяет, допускается ли она к защите. При необходимости преподаватель возвращает РГЗ(Р) студенту для доработки и устанавливает сроки повторного предоставления для проверки. До защиты работы студентом должны быть сделаны необходимые исправления и дополнения по всем замечаниям преподавателя.

При положительном результате оценивания РГЗ(Р) студент её распечатывает, передает на кафедру и защищает до сессии в назначенное преподавателем время.

Защита РГЗ(Р) состоит в индивидуальном устном собеседовании студента с преподавателем. В процессе защиты выявляется уровень знаний студента, степень его самостоятельности при выполнении работы. По результатам защиты студенту выставляется оценка в соответствии с критериями, приведенными в п. 2 настоящего Паспорта.

2. Критерии оценки результатов обучения, соотнесенных с уровнями освоения индикаторов достижения компетенций

Общие правила выставления оценок текущей аттестации определяются балльно-рейтинговой системой, установленной локальным актом НГТУ.

РГЗ(Р) считается выполненной **на продвинутом** уровне, если все необходимые расчеты произведены самостоятельно и без ошибок; все разделы РГЗ(Р) выполнены правильно и в полном объеме; работа оформлена в соответствии с требованиями; сдана преподавателю в указанные сроки и не возвращалась для доработки; даны полные и развернутые выводы и рекомендации; на защите студентом даны уверенные и аргументированные ответы, что свидетельствует об уровне сформированности компетенций и соотнесенных с ними индикаторов на продвинутом уровне. Оценка составляет *от 24 до 28 баллов.*

РГЗ(Р) считается выполненной **на базовом** уровне, если все необходимые расчеты произведены самостоятельно и без существенных ошибок; все разделы РГЗ(Р) выполнены правильно, но есть замечания к полноте предоставления информации; работа оформлена в соответствии с требованиями; сдана преподавателю в указанные сроки и однократно возвращалась студенту для незначительной доработки; в заключении даны выводы и рекомендации; на защите студентом допущены непринципиальные ошибки, что свидетельствует об уровне сформированности компетенций и соотнесенных с ними индикаторов на базовом уровне. Оценка составляет *от 19 до 23 баллов.*

РГЗ(Р) считается выполненной **на пороговом** уровне, если все необходимые расчеты произведены самостоятельно, но с ошибками, часть из которых носит принципиальный характер; есть замечания к полноте предоставления информации; работа оформлена в соответствии с требованиями; сдана преподавателю, но неоднократно возвращалась студенту для доработки; в заключении даны краткие выводы; защита РГЗ(Р) вызывает у студента серьезные затруднения, что свидетельствует об уровне сформированности компетенций и соотнесенных с ними индикаторов на пороговом уровне. Оценка составляет *от 14 до 18 баллов.*

РГЗ(Р) считается **не выполненной**, если расчеты произведены с серьезными ошибками; есть замечания к полноте предоставления информации и оформлению; РГЗ(Р) была сдана преподавателю, но неоднократно возвращалась студенту для доработки, что не привело к улучшению ее качества; РГЗ(Р) не допущена до защиты, что свидетельствует об

не сформированности компетенций и соотнесенных с ними индикаторов. Оценка составляет *менее 14 баллов*.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ(Р) учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

РГЗ(Р) как форма текущей аттестации (контроля) по дисциплине считается успешно выполненной, если сумма полученных баллов по всем его заданиям составляет от 14 до 28 баллов включительно.

4. Примерный вариант РГЗ(Р)

Варианты заданий формируются по последней цифре шифра студента, варьируются от семестра к семестру (во избежание переписывания с потока на поток) и выдаются студенту под роспись. Ниже приводится типовое задание и образец выполнения РГЗ(Р).

Предварительное задание
исходные данные

a, мм	*b, мм*	ρ_0, Ом	ε_r	*Высший тип*
27	*13*	*75*	*1.6*	TM_{22}

1.Рассчитать штыревой ввод энергии для основной волны для$\varepsilon_a = \varepsilon_0$ и $\varepsilon_a = \varepsilon_r\varepsilon_0$

$l_1 = \frac{\lambda_в}{4}, h = \frac{\lambda}{4}$

1.1) $\varepsilon_a = \varepsilon_0, \mu_r = 1$

Скорость света в среде без диэлектрика

$$V_L = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = 3\cdot 10^8 \text{м/с}$$

Основная волна, значит m=1, n=0, тогда

$$k_{10}^{кр} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} = \frac{\pi}{a} = \frac{\pi}{27\cdot 10^{-3}} \approx 116.355 \frac{\text{рад}}{\text{м}}$$

$$\lambda_{кр} = \frac{2\pi}{k_{10}^{кр}} \approx 0.054 \text{ м}$$

$$f_{кр} = \frac{V_L}{\lambda_{кр}} \approx 5.56 \text{ ГГц}$$

Найдем рабочую частоту и соответствующую ей длину волны

$$f_р = 1.5\, f_{кр} = 1.5\cdot 5.56\cdot 10^9 = 8.34 \text{ ГГц}$$

$$\lambda = \frac{c}{f_р} = \frac{3\cdot 10^8}{8.34\cdot 10^9} \approx 0.036 \text{ м}$$

Длина волны в волноводе, волновое сопротивление и число k:

$$\lambda_в = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \approx 0.0484 \text{ м}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_r} = \frac{2\pi}{0.036} \approx 174.4 \frac{\text{рад}}{\text{м}}$$

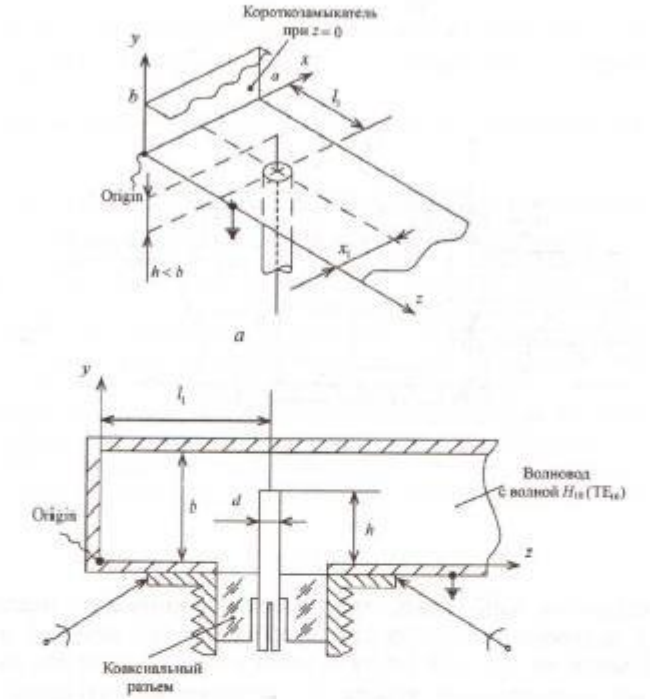
$$\rho_H = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\varepsilon_0\varepsilon_r}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \approx 505.72 \text{ Ом}$$

Расчет искомых параметров l_1, x_1 и h

$$l_1 = \frac{\lambda_в}{4} \approx 0.0121 \text{ м}$$

$$h = \frac{\lambda}{4} \approx 0.009 \text{ м}$$

$$x_1 = \frac{a}{\pi} arcsin\left[\frac{2\pi}{\lambda \cdot (1-\cos(kh))} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 ab}{2\rho_H}}\right] \approx 9.427 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$$



геометрические параметры прямоугольного волновода с штыревым вводом/выводом энергии

1.2) $\boldsymbol{\varepsilon_a = \varepsilon_r \varepsilon_0, \mu_r = 1, \varepsilon_r = 1.6}$

Расчеты аналогичные

$$V_L = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0}} \approx 2.37 \cdot 10^8 \text{м/с}$$

$$k_{10}^{\text{кр}} = \approx 116.355 \frac{\text{рад}}{\text{м}}$$

$$\lambda_{\text{кр}} \approx 0.054\ \text{м}$$

$$f_{\text{кр}} = \frac{V_L}{\lambda_{\text{кр}}} \approx 4.389\ \text{ГГц}$$

$$f_{\text{р}} = 1.5\, f_{\text{кр}} \approx 6.58\ \text{ГГц}$$

$$\lambda = \frac{c}{f_{\text{р}}} \approx 0.0456\ \text{м}$$

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} \approx 0.085\ \text{м}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\varepsilon_r} \approx 174.4 \frac{\text{рад}}{\text{м}}$$

$$\rho_H = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\varepsilon_0\varepsilon_r}}}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \approx 555.07\ \text{Ом}$$

Расчет искомых параметров l_1, x_1 и h

$$l_1 = \frac{\lambda_в}{4} \approx 0.0212\text{м}$$

$$h = \frac{\lambda}{4} \approx 0.0114\ \text{м}$$

$$x_1 = \frac{a}{\pi} arcsin\left[\frac{2\pi}{\lambda\cdot(1-\cos(kh))}\cdot\sqrt{\frac{\rho_0 ab}{2\rho_H}}\right] \approx 4.285\cdot 10^{-3}\ \text{м}$$

2. Расчет и построение дисперсионных характеристик основной и высшей волны для$\varepsilon_а = \varepsilon_0$ и $\varepsilon_а = \varepsilon_r\varepsilon_0$в диапазоне частот $f_{кр} < f < 2f_{кр}$

Фазовые скорости волн для высшей волны TM_{22}

m=2, n=2

$$k_{22}^{кр} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \approx 536.43\ \text{рад/м}$$

Для среды без диэлектрика:

$$V_{L0} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = 3\cdot 10^8\text{м/с}$$

$$f_{кр0}^{22} = \frac{k_{22}^{кр}\cdot V_{L0}}{2\pi} \approx 2.56\cdot 10^{10}\text{Гц}$$

$$V_{ф0}^{22}(f) = \frac{V_{L0}}{\sqrt{1-\left(\frac{f_{кр0}^{22}}{f}\right)^2}}$$

Для среды с диэлектриком:

$$V_L = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r\varepsilon_0\mu_0}} \approx 2.37\cdot 10^8\text{м/с}$$

$$f_{кр}^{22} = \frac{k_{22}^{кр}\cdot V_L}{2\pi} \approx 2.0234\cdot 10^{10}\text{Гц}$$

$$V_ф^{22}(f) = \frac{V_L}{\sqrt{1-\left(\frac{f_{кр}^{22}}{f}\right)^2}}$$

Фазовые скорости волн для основной волны TM_{10}

m=1, n=0

$$k_{10}^{\text{кр}} = \frac{\pi}{a} \approx 116.355 \frac{\text{рад}}{\text{м}}$$

Для среды без диэлектрика:

$$V_{L0} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{м/с}$$

$$f_{\text{кр0}}^{10} = \frac{k_{10}^{\text{кр}} \cdot V_{L0}}{2\pi} \approx 5.552 \text{ ГГц}$$

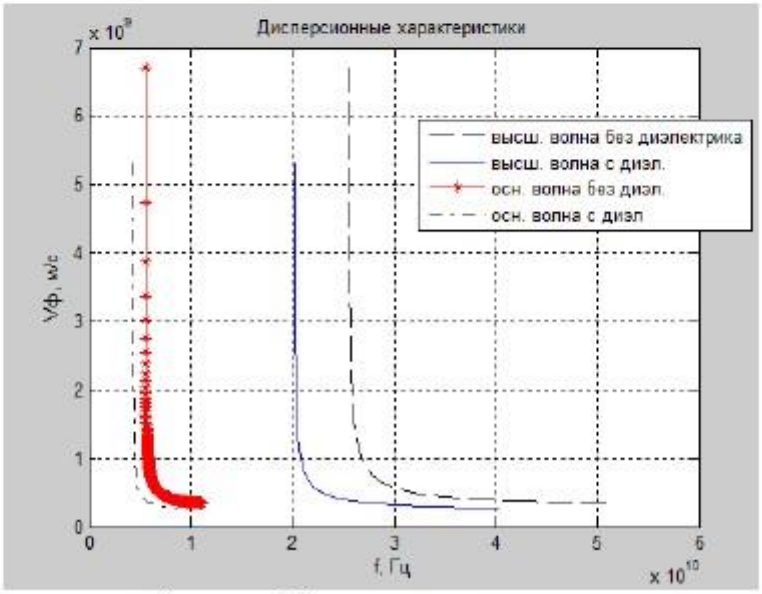
$$V_{\text{ф0}}^{10}(f) = \frac{V_{L0}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{\text{кр0}}^{10}}{f}\right)^2}}$$

Для среды с диэлектриком

$$V_L = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0}} \approx 2.37 \cdot 10^8 \text{м/с}$$

$$f_{\text{кр}}^{10} = \frac{k_{10}^{\text{кр}} \cdot V_L}{2\pi} \approx 4.39 \text{ ГГц}$$

$$V_{\text{ф}}^{10}(f) = \frac{V_L}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{\text{кр}}^{10}}{f}\right)^2}}$$



Построение поля высшей волны TM_{22} в волноводе

$$\dot{E}_z = B\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right),$$

$$\dot{E}_z = B\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)e^{-j\beta z},$$

$$\gamma = j\beta,$$

$$\dot{H}_z = 0.$$

Имеем векторные уравнения:

$$-k^2\overline{\dot{E}_s} = \gamma\ grad_s\dot{E}_z + j\omega\mu_a\left[grad_s\dot{H}_z, \overline{z_0}\right],$$

$$-k^2\overline{\dot{H}_s} = \gamma\ grad_s\dot{H}_z - j\omega\varepsilon_a\left[grad_s\dot{E}_z, \overline{z_0}\right],$$

для волны типа ТМсправедливо

$$\overline{\dot{E}_S} = -\frac{\gamma}{k^2}grad_s\dot{E}_z = \overline{x_0}\dot{E}_x + \overline{y_0}\dot{E}_y,$$

$$\dot{E}_x = -\frac{j\beta}{k^2}\cdot\frac{m\pi}{a}B\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right),$$

$$\dot{E}_y = -\frac{j\beta}{k^2}\cdot\frac{n\pi}{b}B\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right).$$

Для волн ТМ-типа выполняется:

$$\overline{\dot{H}_s} = \frac{j\omega\varepsilon_a}{k^2}\left[grad_s\dot{E}_z, \overline{z_0}\right] = \frac{j\omega\varepsilon_a}{k^2}\left[\frac{-k^2}{\gamma}\overline{\dot{E}_S}, \overline{z_0}\right] = -\frac{1}{\rho_E}\left[\overline{\dot{E}_S}, \overline{z_0}\right] = \frac{\omega\varepsilon_a}{\beta}\left[\overline{z_0}, \overline{\dot{E}_S}\right],$$

$$\rho_E = \frac{\gamma}{j\omega\varepsilon_a},\quad \left[\overline{z_0}, \overline{\dot{E}_S}\right] = -\overline{x_0}\dot{E}_y + \overline{y_0}\dot{E}_x,$$

$$\dot{H}_x = -\frac{\omega\varepsilon_a}{\beta}\dot{E}_y,$$

$$\dot{H}_y = \frac{\omega\varepsilon_a}{\beta}\dot{E}_x.$$

Временные функции векторных составляющих магнитного и электрического полей:

$$e_z = \mathrm{Re}\left[\dot{E}_Z e^{-j\beta z}\right] = B\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\cos(\omega t - \beta z),$$

$$e_y = \mathrm{Re}\left[\dot{E}_y e^{-j\beta z}\right] = \frac{\beta}{k^2}\cdot\frac{n\pi}{b}B\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t - \beta z),$$

$$e_x = \mathrm{Re}\left[\dot{E}_x e^{-j\beta z}\right] = \frac{\beta}{k^2}\cdot\frac{m\pi}{a}B\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t - \beta z),$$

$$h_x = -\frac{\omega\varepsilon_a}{k^2}\cdot\frac{n\pi}{b}B\sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t - \beta z),$$

$$h_y = \frac{\omega\varepsilon_a}{k^2}\cdot\frac{m\pi}{a}B\cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t - \beta z),$$

$$h_z = 0.$$

Для полноты найдем также векторные составляющие вектора плотности тока смещения.

$$\overline{J_{см}} = \varepsilon_a \frac{\partial \overline{E}}{\partial t},$$

$$J_{см\,x} = \varepsilon_a \frac{\omega\beta}{k^2} \cdot \frac{m\pi}{a} B \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\cos(\omega t - \beta z),$$

$$J_{см\,y} = \varepsilon_a \frac{\omega\beta}{k^2} \cdot \frac{n\pi}{b} B \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\cos(\omega t - \beta z),$$

$$J_{см\,z} = -\varepsilon_a \omega B \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)\sin(\omega t - \beta z).$$

Построим электрическое и магнитное поля, а также плотность тока смещения для разных сечений волновода.

$m = 2,\ n = 2,$

$k_{кр} \approx 536.43$ рад/м,

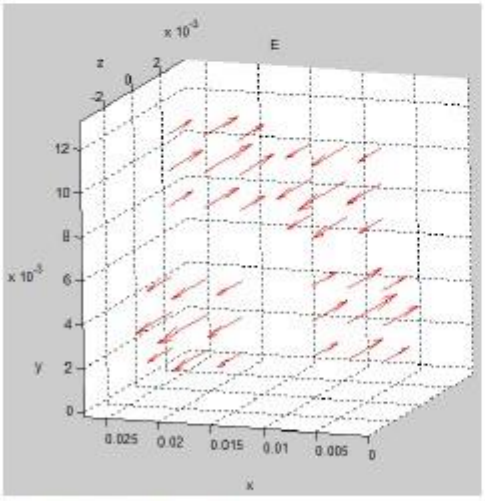
$\upsilon_L = 3 \cdot 10^8$ м/с, $\lambda_{кр} \approx 11.7$ мм, $f_{кр} \approx 2.56 \cdot 10^{10}$ Гц,

$f_р = 1.5 f_{кр} \approx 3.84 \cdot 10^{10}$ Гц, $\omega = 2\pi f_р \approx 2.41 \cdot 10^{11}$ рад/с,

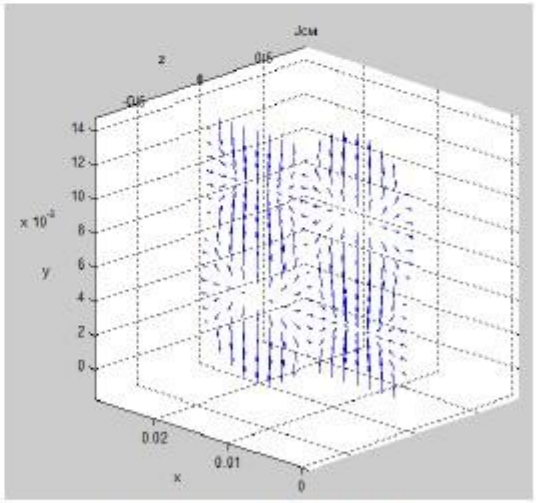
$\lambda_в \approx 10.5$ мм, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_в} \approx 599.74$ рад/м,

считаем, что $B = 1$.

1. $\omega t - \beta z = 0$



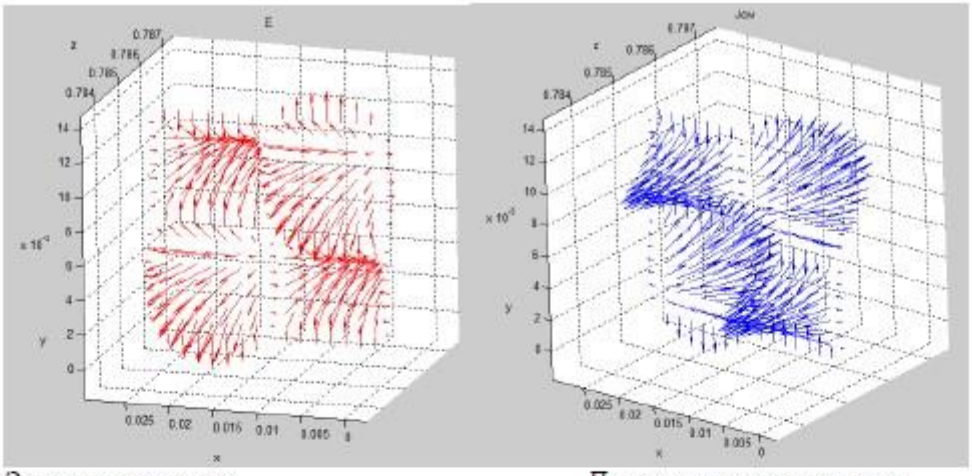
Электрическое поле.



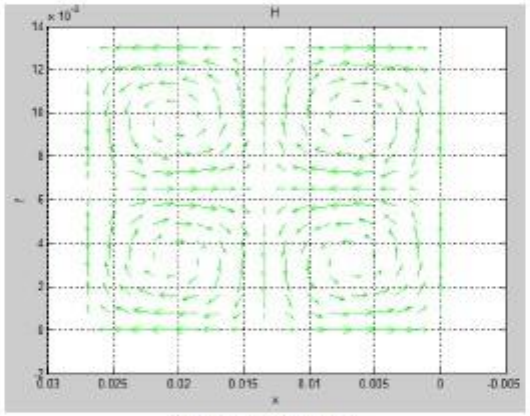
Плотность тока смещения.

Магнитное поле в этом сечении отсутствует.

2. $\omega t - \beta z = \frac{\pi}{4}$

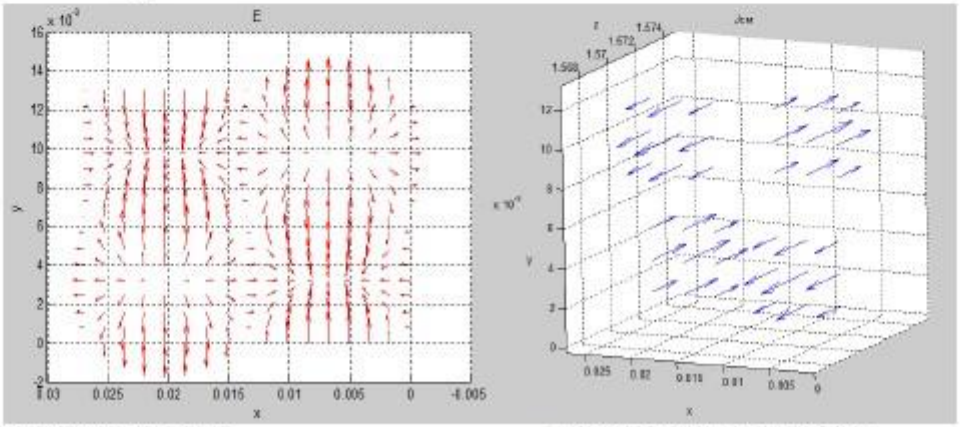


Электрическое поле. *Плотность тока смещения*

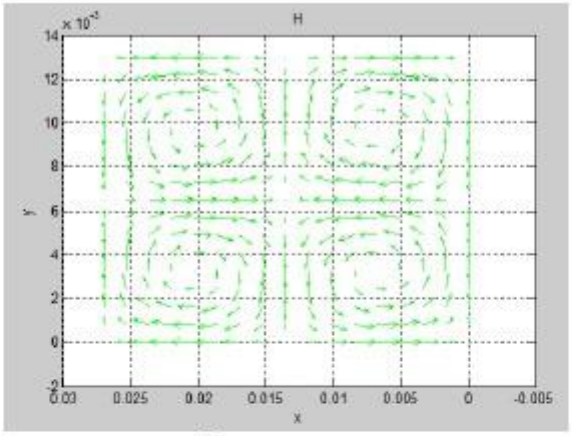


Магнитное поле

3. $\omega t - \beta z = \frac{\pi}{2}$

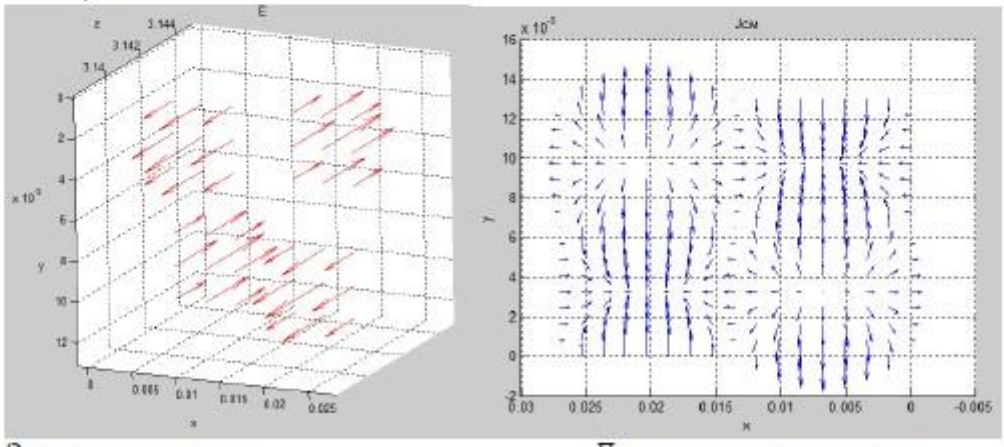


Электрическое поле. *Плотность тока смещения.*



Магнитное поле

4. $\omega t - \beta z = \pi$



Электрическое поле. *Плотность тока смещения*

Магнитное поле в этом сечении отсутствует.